

ОСОБЕННОСТИ СКАНИРУЮЩЕЙ ТУННЕЛЬНОЙ МИКРОСКОПИИ ВЫСОКООМНЫХ ПЛЕНОК: ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ

А.Е. Почтенный, О.М. Стукалов*, И.П. Ильюшонок

Белорусский государственный технологический университет

*Институт физики твердого тела и полупроводников НАН Беларуси

Целью данной работы является исследование методом сканирующей зондовой микроскопии (СТМ) высокоомных пленок фталоцианинов меди и свинца и объяснение особенностей локальных вольтамперных характеристик и СТМ-изображений этих пленок.

Наиболее полное теоретическое описание туннельных токов в рамках ВКБ-приближения разработано Симмонсом [1,2] для потенциальных барьеров произвольной формы, и именно это описание используется в настоящее время для интерпретации данных СТМ [3]. В модели Симмонса путем введения сил изображения учитывается поляризация материала при эмиссии из него электронов [1,2], а также рассматривается ситуация, когда разделенные туннельным зазором материалы (в случае СТМ-измерений зонд и образец) имеют разные работы выхода [2]. Туннельный ток I в модели Симмонса описывается в случае прямого напряжения соотношением [2]

$$I = I_0 \cdot \left\{ \Phi_2 \exp\left(-A\Phi_2^{1/2}\right) - \left(\Phi_2 + eV_t\right) \exp\left[-A\left(\Phi_2 + eV_t\right)^{1/2}\right] \right\}, \quad (1)$$

а в случае обратного напряжения

$$I = I_0 \cdot \left\{ \Phi_1 \exp\left(-A\Phi_1^{1/2}\right) - \left(\Phi_1 + eV_t\right) \exp\left[-A\left(\Phi_1 + eV_t\right)^{1/2}\right] \right\}. \quad (2)$$

Под прямым напряжением здесь подразумевается такое напряжение, при котором материал с большей работой выхода находится под отрицательным потенциалом. Соответственно, обратное напряжение соответствует случаю, когда материал с меньшей работой выхода находится под отрицательным потенциалом. В уравнениях (1) и (2) e – заряд электрона, V_t – напряжение на туннельном зазоре, $A = 1,024(s_2 - s_1)$, а также используются следующие обозначения:

$$I_0 = \frac{B}{(s_2 - s_1)^2}, \quad (3)$$

где B – постоянная,

$$s_1 = \frac{1,2\lambda s}{\Phi_2}, \quad (4)$$

$$s_2 = s - \frac{9,2\lambda s}{3\phi_2 + 4\lambda - 2(eV_t + \phi_2 - \phi_1)} + s_1 \quad (5)$$

в случае прямого напряжения, а в случае обратного напряжения

$$s_1 = \frac{1,2\lambda s}{\phi_1}, \quad (6)$$

$$s_2 = \frac{9,2\lambda s}{3\phi_1 + 4\lambda - 2(eV_t - \phi_2 + \phi_1)} + s_1. \quad (7)$$

В уравнениях (4) – (7) s – ширина туннельного зазора, ϕ_1 и ϕ_2 – работы выхода материалов, между которыми осуществляется туннелирование, $\lambda = 4,99/s$. Величины Φ_1 и Φ_2 определяются соотношениями

$$\Phi_1 = \phi_1 + \frac{(s_1 + s_2)(\phi_2 - \phi_1) - eV_t}{2s} - \left(\frac{1,15\lambda s}{s_2 - s_1} \right) \cdot \ln \left[\frac{s_2(s - s_1)}{s_1(s - s_2)} \right], \quad (8)$$

$$\Phi_2 = \phi_2 - \frac{(s_1 + s_2)(\phi_2 - \phi_1) + eV_t}{2s} - \left(\frac{1,15\lambda s}{s_2 - s_1} \right) \cdot \ln \left[\frac{s_2(s - s_1)}{s_1(s - s_2)} \right]. \quad (9)$$

В сканирующем туннельном микроскопе напряжение V прикладывается между зондом и подложкой образца. В случае проводящих образцов это напряжение с большой степенью точности равно напряжению на туннельном зазоре V_t . Если же используются высокоомные образцы, то сопротивление образца R_s может быть сравнимо с сопротивлением туннельного зазора. В этом случае напряжение V перераспределится между исследуемым образцом и туннельным зазором. Входящее в уравнения (1) – (9) напряжение в этом случае равно

$$V_t = V - IR_s, \quad (10)$$

и зависит от величины туннельного тока. Это обстоятельство должно оказать влияние как на СТМ-изображения высокоомных пленок, так и на локальные вольтамперные характеристики структуры высокоомная пленка – туннельный зазор – зонд СТМ.

Для сопоставления расчетов по формулам (1) – (10) с экспериментальными данными были проведены исследования высокоомных поликристаллических пленок фталоцианина меди (CuPc) и фталоцианина свинца (PbPc). Пленки толщиной 100 нм были получены лазерным напылением в вакууме на поликоровые подложки с никелевым покрытием. Исследования проводились на сканирующем зондовом микроскопе Фемтоскан 001. Измерялась топография поверхности методом атомно-силовой микроскопии (АСМ), а также были получены СТМ-изображения поверхности пленок в режиме постоянного тока и измерены локальные вольтамперные характеристики исследуемых структур.

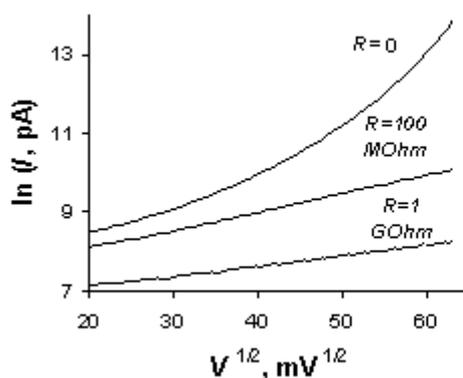


Рис.1

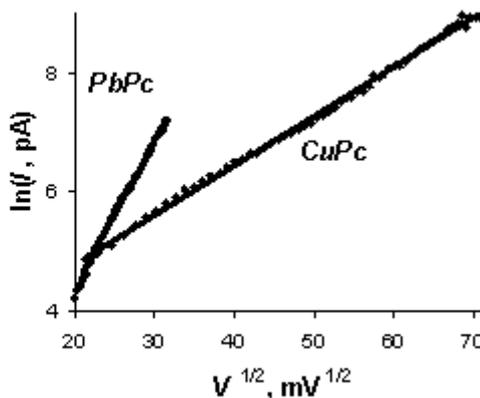


Рис.2

На рис. 1 приведены вольтамперные характеристики, рассчитанные по формулам (1) – (10) при различных значениях сопротивления образца. Расчеты показывают, что при высоких значениях сопротивления, сравнимых с сопротивлением туннельного зазора, вольтамперные характеристики линейризуются в координатах $\ln I - V^{1/2}$. Такая линейризация наблюдается экспериментально в случае фталоцианинов (рис.2), причем, в согласии с расчетами, наклон вольтамперной характеристики для PbPc больше, чем для CuPc, имеющего большее сопротивление.

Уравнения (1) – (10) позволяют рассчитать профили СТМ-изображений поверхности высокоомных пленок. Кривая *a* на рис.3 показывает профиль поверхности $z(x)$, заданный как

$$z = (r^2 - x^2)^{1/2}, \quad (11)$$

то есть в виде полуокружностей с радиусом $r = 20$ нм. Кривая *b* рассчитана как

$$z = (r^2 - x^2)^{1/2} + s - s(0), \quad (12)$$

где величина туннельного зазора s вычислена по уравнениям (1) – (10), а величина $s(0)$ представляет собой значение s при $x = 0$. Сопротивление образца в уравнении (10) также является функцией координаты x и равно

$$R_s = R_L \cdot (r^2 - x^2)^{1/2} \quad (13)$$

где величина R_L представляет собой удельное слоевое сопротивление. Кривая *b* на рис.3 рассчитана при значении $R_L = 1$ ГОм / нм. Результаты расчетов показывают, что высокое сопротивление пленки приводит к сглаживанию профиля, полученного методом СТМ, по сравнению с реальным. Приведенные на рис.4 профили поверхности одной и той же пленки PbPc, полученные методами АСМ и СТМ, подтверждают результаты расчетов. Действительно, размах высот и шероховатость профиля и площадь СТМ-изображения заметно меньше, чем соответствующие характеристики АСМ-изображения.

Расчеты по уравнениям (1) – (13) предсказывают также уменьшение измеренных значений размаха высот и шероховатости профиля, а также площади СТМ-изображения высокоомных пленок при увеличении туннельного тока, при котором производятся

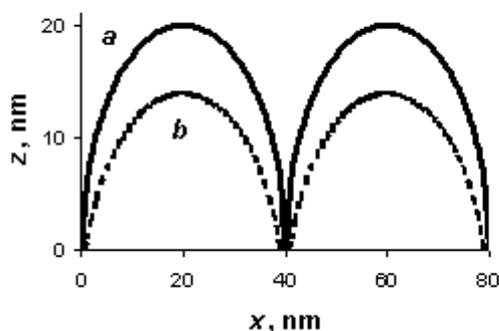


Рис.3

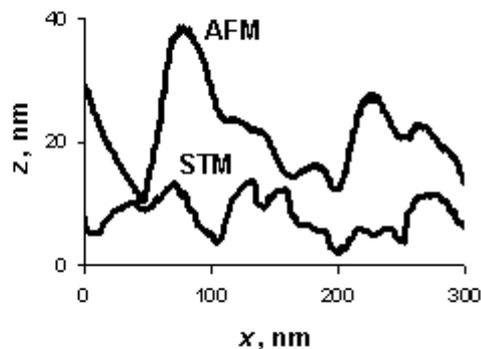


Рис.4

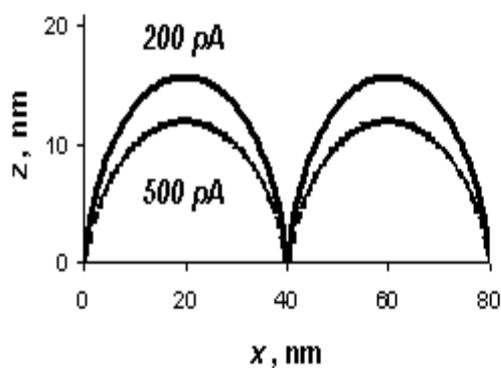


Рис.5

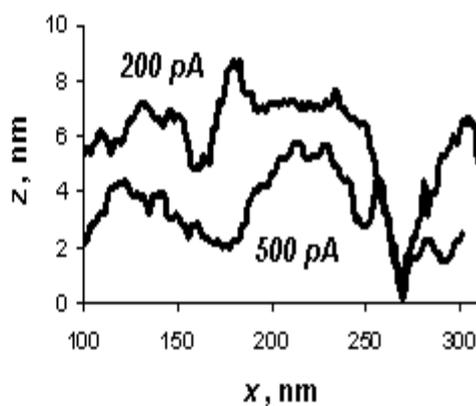


Рис.6

измерения (рис.5). Эти результаты подтверждаются экспериментально, как показывают приведенные на рис.6 данные для PbPc.

Таким образом, высокое сопротивление пленок фталоцианинов действительно влияет как на СТМ-изображения пленок, так и на локальные вольтамперные характеристики. Полученные результаты объясняют расхождение между данными АСМ и СТМ для пленок высокоомных материалов и могут использоваться для интерпретации СТМ-изображений пленок подобных материалов. Сопоставление расчетов по формулам (1) – (10) с экспериментальными вольтамперными характеристиками позволяет определять локальное (в нанометровом диапазоне) электрическое сопротивление пленок с неоднородной поверхностью. Возможность селективного изменения сопротивления компонентов композитных пленок, к примеру, фотовозбуждением, открывает перспективы для локального анализа состава многокомпонентных пленок высокоомных материалов.

Работа выполнена при поддержке Государственной программы фундаментальных исследований «Поверхность» (грант ГБ21-102) и Фонда фундаментальных исследований Республики Беларусь (грант Ф02Р-074).

Литература

1. J.G. Simmons, J. Appl. Phys. **34**, 1793 (1963)
2. J.G. Simmons, J. Appl. Phys. **34**, 2581 (1963)
3. D. Sarid, *Exploring Scanning Probe Microscopy with Mathematica*, John Wiley & Sons, New York (1997)